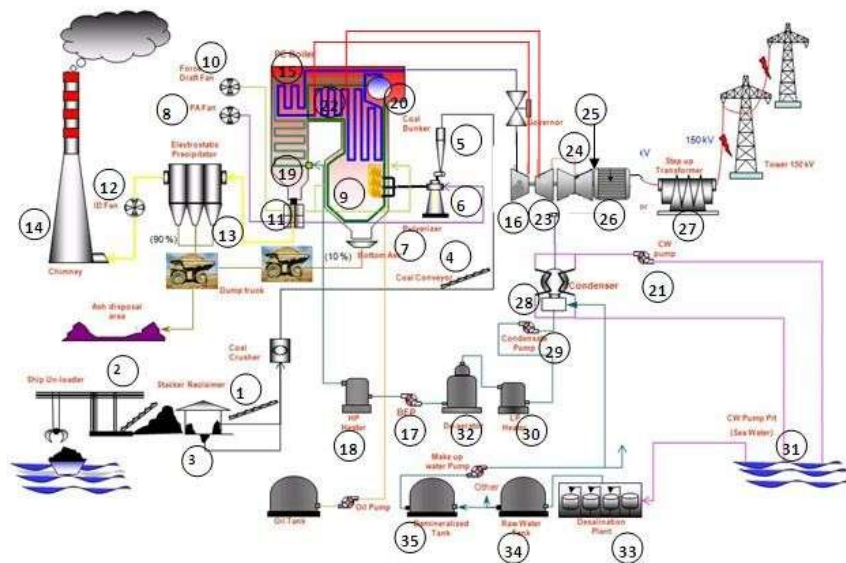


BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Pengertian PLTU

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama dari pembangkit listrik jenis ini adalah Generator yang seporos dengan turbin yang digerakkan oleh tenaga kinetik dari uap panas/kering. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan berbagai macam bahan bakar terutama batu bara dan minyak bakar serta MFO untuk start up awal.



Gambar 2.1 Proses Produksi Energi Listrik pada PLTU

2.2 Prinsip Kerja PLTU

Prinsip kerja PLTU dimulai dari pengambilan air laut dengan menggunakan pompa air laut (*Sea Water Pump*). Proses pertama pengolahan air adalah dengan disaring terlebih dahulu untuk menghilangkan kotoran-kotoran atau sampah yang berukuran cukup besar. Setelah itu air diinjeksikan dengan *chlorine* untuk membuat mabuk biota – biota laut yang ada di air laut,

sehingga biota laut tidak membuat sarang atau berkembang biak di *tube condenser* dan pipa line CWP.

Setelah itu air menuju ke *desalination plant*. Di *desalination plant* ini air laut diolah untuk menghilangkan kadar garam dari air laut. *Desalination plant* di PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar menggunakan RO (*Reverse Osmosis*). Prosesnya adalah dengan memompakan air laut untuk masuk kedalam vessel – vessel yang didalam terdapat membran semipermiabile. Pada proses ini molekul garam tidak dapat menembus membran sehingga yang mengalir hanyalah molekul air saja. Sehingga setelah melewati proses RO air laut akan berubah menjadi air tawar dan ditampung pada *fresh water storage tank*.

Proses selanjutnya adalah proses penghilangan mineral - mineral yang terkandung di air tawar yang terjadi di WTP (*Water Treatment Plant*). Proses yang terjadi di *Water Treatment Plant* adalah peningkatan ion – ion positif dan negatif dari *raw water* dengan menggunakan resin. Resin yang digunakan bermuatan positif dan negatif, jadi ion positif yang terkandung dalam air akan terikat oleh resin bermuatan negatif, sementara ion negatif yang terkandung dalam air akan terikat oleh resin bermuatan positif.

Hasil dari WTP adalah *demin water* (air bebas mineral) yang ditampung di *demin water tank*. *Demin water* dari *demin water tank* ini kemudian dipompakan menuju *condensate tank*. Di *condensate tank* ini air ditampung dan akan digunakan untuk menambah air kondensat di *condenser* bila terjadi kekurangan. Setelah melewati *condenser*, air kondensat akan dipompakan menggunakan *condensate pump* menuju *low pressure heater* untuk pemanasan awal. Media pemanasnya adalah uap ekstraksi yang diambil dari *low pressure turbine* (LP Turbin). Pada PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar terdapat 4 LP heater yaitu LP heater 5,6,7,8.

Prinsip kerjanya adalah air pengisi dialirkan di dalam pipa, dan uap panas mengalir di luar pipa. Setelah dipanasi di LP heater air pengisi kemudian dialirkan menuju *deaerator* untuk proses penghilangan unsur

oksigen yang masih terkandung dalam air pengisi. Di dalam *deaerator* terjadi kontak langsung antara air pengisi dan uap oleh karena itu disebut *open feed water (direct contact)*. Uap akan memisahkan gas dari air pengisi untuk kemudian gas – gas tersebut bergerak dengan cepat ke bagian atas *deaerator* dan selanjutnya dibuang ke atmosfer. Uap yang digunakan berasal dari ekstraksi uap IP *turbine*. Setelah dari *deaerator* air langsung dipompakan oleh *boiler feed pump* menuju HP *heater* untuk memanaskan air pengisi. Prinsip kerja dari HP *heater* sama dengan LP *heater*, bedanya hanya pada uap ekstraksi yang digunakan dimana HP *heater* menggunakan uap ekstraksi dari HP dan IP *turbine*. Pada PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar terdapat 3 HP *heater* 1,2,3. Air kemudian masuk ke economizer untuk pemanasan akhir air sebelum masuk ke *steam drum*. *Steam drum* adalah alat yang digunakan untuk menampung sekaligus memisahkan air pengisi *boiler* yang masih berbentuk air dengan yang sudah berbentuk uap basah. Prinsip kerjanya secara alami, maksudnya adalah air yang sudah menjadi uap akan berada diatas, dan yang masih berwujud air akan berada di bagian bawah *steam drum*. Uap akan langsung dialirkan ke superheater, sementara air akan turun melewati *water wall* untuk diuapkan dan kemudian dialirkan ke *superheater*.

Di superheater uap basah dari *steam drum* dan *water wall* akan dipanaskan lagi menjadi uap panas lanjut (uap kering). Uap panas lanjut ini kemudian dialirkan ke HP *turbine* untuk memutar sudu – sudu HP *turbine*. Setelah digunakan di HP *turbine* uap akan mengalami ekspansi (tekanan dan temperature uap turun). Uap dari HP *turbine* akan kembali dipanaskan di *boiler* melalui *reheater*. Di dalam *reheater*, uap akan dipanaskan lagi pada tekanan konstan lalu dialirkan ke IP *turbine* untuk memutar sudu – sudu IP *turbine*. Setelah digunakan di IP *turbine* uap tidak dipanaskan lagi, tapi langsung dialirkan ke LP *turbine* untuk memutar sudu – sudu LP *turbine*. Terakhir, uap yang keluar dari LP *turbine* kemudian di alirkan di *condenser* untuk dikondensasikan menjadi air pengisi. Proses kondensasi uap menggunakan media tube – tube kecil yang dialiri oleh air laut sebagai pendinginnya yang dipompakan oleh CWP (*circulating water pump*). Air

kondensat ini kemudian digunakan lagi sebagai air pengisi *boiler* dengan proses yang sama. Begitulah siklus air dan uap yang terjadi di PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar – Awar.

2.3 Komponen Utama PLTU

2.3.1 Boiler

Boiler adalah alat yang digunakan untuk menguapkan air pengisi dari fasa cair menjadi uap basah dan kemudian uap basah akan diuapkan lagi menjadi uap panas lanjut. Di dalam boiler ada beberapa alat yang berfungsi untuk mengolah air, yaitu *economizer*, *steam drum*, *superheater*, dan juga *reheater*. Model boiler di PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar adalah HG1175/17.5-HM4, dengan spesifikasi sebagai berikut :

Tabel 2.1 Spesifikasi Boiler

Items	Unit	Max. load
<i>Evaporator</i>	t/h	1175
<i>Working pressure of drum</i>	Mpa	18.9
<i>Outlet pressure of superheater</i>	Mpa	17.5
<i>Outlet temperature of superheater</i>	°C	541
<i>Outlet pressure of reheater</i>	Mpa	3.724
<i>Inlet temperature of reheat steam</i>	°C	336.9
<i>Outlet temperature of reheat steam</i>	°C	541
<i>Flow volume of reheat steam</i>	t/h	971.05

<i>Feed water pressure</i>	Mpa	19.293
<i>Feed water temperature</i>	°C	287.3

2.3.2 Turbin Uap

Turbin uap merupakan suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan selanjutnya diubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin, langsung atau dengan bantuan roda gigi reduksi, dihubungkan dengan mekanisme yang akan digerakkan. Tergantung pada jenis mekanisme yang digunakan, turbin uap dapat digunakan pada berbagai bidang seperti pada bidang industri, untuk pembangkit tenaga listrik dan untuk transportasi. Pada proses perubahan energi potensial menjadi energi mekanisnya yaitu dalam bentuk putaran poros dilakukan dengan berbagai cara.

Pada dasarnya turbin uap terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator dan rotor yang merupakan komponen utama pada turbin kemudian di tambah komponen lainnya yang meliputi pendukungnya seperti bantalan, kopling dan sistem bantu lainnya agar kerja turbin dapat lebih baik. Sebuah turbin uap memanfaatkan energi kinetik dari fluida kerjanya yang bertambah akibat penambahan energi termal.

Umumnya PLTU menggunakan turbin uap tipe *multistage*, yakni turbin uap yang terdiri atas lebih dari 1 *stage* turbin (*Turbin High Pressure, Intermediate Pressure, dan Low Pressure*). Uap air superheater yang dihasilkan oleh boiler masuk ke turbin *High Pressure* (HP), dan keluar pada sisi exhaust menuju ke boiler lagi untuk proses reheater. Uap air yang dipanaskan kembali ini dimasukkan kembali ke turbin uap sisi *Intermediate Pressure* (IP), dan uap yang keluar dari turbin IP akan langsung masuk ke Turbin *Low Pressure* (LP). Selanjutnya uap air yang keluar dari turbin LP masuk ke dalam kondenser untuk mengalami proses kondensasi.

2.3.3 Kondensor

Kondensor adalah suatu alat yang digunakan untuk mengkondensasikan uap dari *LP turbine* dengan media pendingin air laut yang dipompakan melalui CWP. Prinsip kerjanya adalah uap dari *LP turbine* mengalir di luar pipa – pipa condenser melewati air laut yang mengalir di dalam pipa – pipa kondensor.

Berikut merupakan spesifikasi dari kondensor :

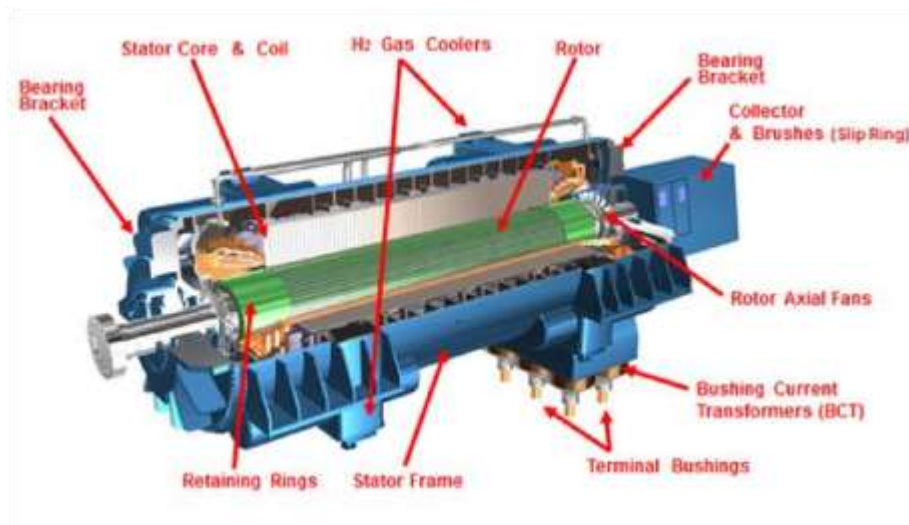


Gambar 2.2 Kondensor

2.3.4 Generator

Generator atau yang sering disebut dengan alternator merupakan suatu alat yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik yang berasal dari putaran shaft turbin, menjadi energi listrik dengan perantara induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator. Pergerakan relatif ini menghasilkan medan putar pada belitan medan di rotor kemudian menginduksi belitan jangkar dari generator yang terdapat pada stator. Ada dua istilah yang biasa menggambarkan belitan pada generator yaitu belitan medan (field windings) dan belitan jangkar (armature windings). Secara umum, istilah belitan medan digunakan pada belitan yang menghasilkan medan magnet dalam mesin,

sedangkan istilah belitan jangkar digunakan pada belitan tempat terinduksinya tegangan. Pada generator, belitan medan terletak pada rotor sedangkan belitan jangkar terdapat pada stator. Rotor generator yang terdiri dari belitan medan memperoleh energi eksitasi dari arus searah (direct current, DC) melalui satu set slip ring dan brush (external excitation), atau dari diode-bridge yang dipasang pada bagian rotor (self-excited). Alternator ini disebut generator karena kecepatan putar medan magnet sama dengan kecepatan putar rotor generator sehingga dihasilkan frekuensi listrik yang dihasilkan dengan putaran mekanis dari generator. Generator ini dapat berupa generator AC satu fasa atau generator AC tiga fasa tergantung dari kebutuhan. Generator dengan kapasitas yang relatif besar sering dijumpai pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik misalnya pada PLTU, PLTA, PLTG, PLTD, dan lain-lain. Selain generator dengan kapasitas besar, tentunya juga terdapat generator dengan kapasitas yang relatif kecil, misalnya pada generator set.



Gambar 2.3 Konstruksi Generator

Generator mengonversikan energi mekanik menjadi energi listrik bolak-balik secara elektromagnetik. Energi mekanik ini berasal dari penggerak mula (prime mover) yang memutar rotor, sedangkan energi listrik dihasilkan dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan di stator. Ada berbagai macam penggerak mula diantaranya turbin gas atau turbin uap yang porosnya dikopel dengan rotor dari generator. Jadi secara umum, konstruksi dari generator terdiri

atas stator dan rotor. Stator merupakan bagian dari generator yang diam, sedangkan rotor merupakan bagian yang berputar. Pada generator, arus DC diterapkan pada lilitan rotor untuk menghasilkan medan magnet rotor. Rotor generator diputar oleh prime mover menghasilkan medan magnet berputar pada mesin. Medan magnet putar ini menginduksi tegangan tiga fasa pada kumparan stator generator. Rotor pada generator pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar.

Kutub magnet yang biasa digunakan pada rotor generator ada 2 jenis bentuk sebagai berikut.

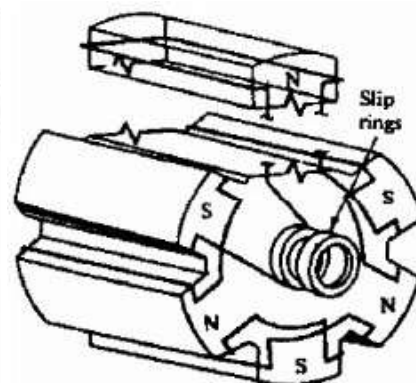
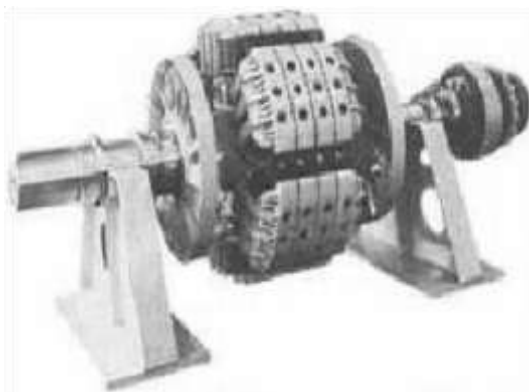
1. Kutub sepatu atau menonjol (*salient*)

Kutub menonjol terdiri dari inti kutub, badan kutub dan sepatu kutub. Kumparan medan dililitkan pada badan kutub. Pada sepatu kutub juga dipasang kumparan peredam (*damper winding*). Kumparan kutub dari tembaga, badan kutub dan sepatu kutub dari besi lunak.

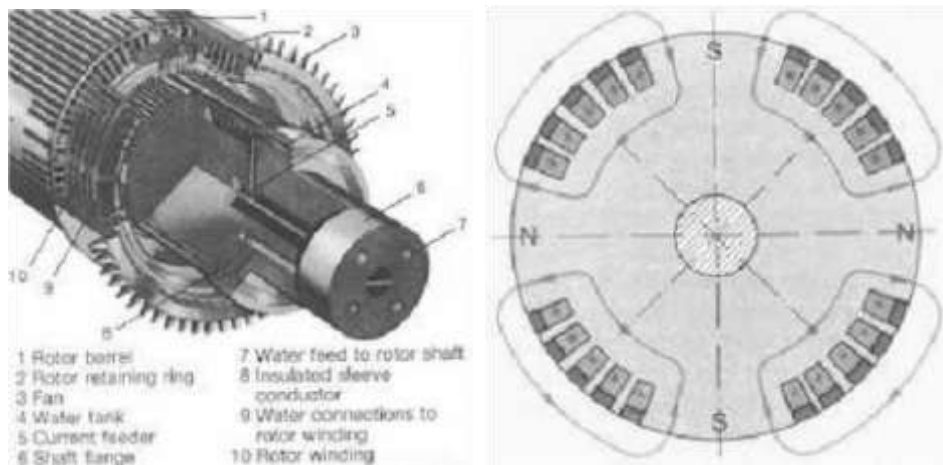
2. Kutub silindris (*non salient*).

Kutub ini terdiri dari alur-alur dan gigi yang dipasang untuk menempatkan kumparan medan.

Gambaran bentuk konstruksi rotor kutub sepatu dan kutub silindris pada generator diperlihatkan pada gambar 3.4.



a) Rotor *Salient* (kutub menonjol) pada generator



b) Rotor Silindris

c) Penampang Rotor Kutub Silindris

Gambar 2.4 Bentuk Konstruksi Rotor pada Generator

Pemilihan konstruksi rotor tergantung dari kecepatan putar penggerak mula, frekuensi dan rating daya generator. Pada kutub sepatu (*salient*), kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Rotor kutub sepatu ini biasanya digunakan untuk rotor dengan empat atau lebih kutub. Karena kutub rotornya banyak, maka biasanya rotor ini digerakkan dengan kecepatan yang rendah. Pada kutub silindris (*non salient*), konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor yang membentuk seperti silinder. Rotor silinder ini umumnya digunakan untuk rotor dua kutub dan empat kutub. Rotor ini biasanya digerakkan dengan kecepatan tinggi sehingga genetor yang menggunakan kutup ini biasanya disebut juga dengan turbo generator. Generator dengan kecepatan 1500 rpm ke atas pada frekuensi 50 Hz dengan rating daya sekitar 10 MVA biasanya menggunakan rotor silinder. Sementara untuk daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah maka digunakan rotor kutub sepatu. Generator-generator ini biasanya membentuk medan magnet dengan bantuan kumparan yang dililitkan pada rotornya, kemudian kumparan ini diberi sumber DC dengan sistem pengaturan yang baik sehingga besar arus yang melewati kumparan dapat diatur untuk mengatur kuat medan yang akan dihasilkan rotor.

Ada 2 cara pemasukan Arus DC (sebagai arus medan) ke rangkaian medan rotor untuk membentuk medan magnet pada kumparan rotor, yaitu:

1. Menyuplai daya DC ke rangkaian rotor dari sumber DC eksternal (biasanya berupa batere dari luar) dengan sarana *slip ring* dan sikat. Bila generator ini hanya menerima sumber DC dari luar untuk *start* awal saja, maka sumber DC sebagai penguat kumparan medan selanjutnya diambil dari keluaran generator itu sendiri (setelah sumber dari batere dilepas) dengan cara merubah keluaran AC generator ini menjadi DC (disearahkan sebelum dimasukkan ke kumparan medan pada rotor)
2. Menyuplai daya DC dari sumber DC khusus yang ditempelkan langsung pada batang rotor generator . Sumber DC ini biasanya dari generator DC yang ditempel pada rotor generator.

2.3.5 Transformator

Transformator adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga atau daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Dalam sistem PLTU terdapat 3 macam transformator, yaitu :

1. UAT (Unit Auxiliary Transformer)

UAT (Unit Auxiliary Transformer) adalah trafo utama untuk pemakaian sendiri yang dipasang paralel dengan trafo generator, berfungsi untuk menurunkan tegangan pembangkitan 20 KV menjadi 6,3 KV. Pada sistem keadaan normal seluruh kebutuhan tenaga listrik untuk peralatan listrik maupun penerangan disuplai oleh trafo ini.

2. SST (Standby Startup Transformer)

PLTU Tanjung Awar – Awar mempunyai satu set trafo cadangan SST bila generator mengalami gangguan atau overhaul sehingga trafo utama tidak berfungsi maka daya listrik untuk start up pembangkit unit disuplai dari bus 150 KV melalui trafo cadangan ini. Jadi trafo ini menurunkan tegangan dari 150 KV menjadi 6,3 KV.

3. Trafo Generator (Generator Transformer)

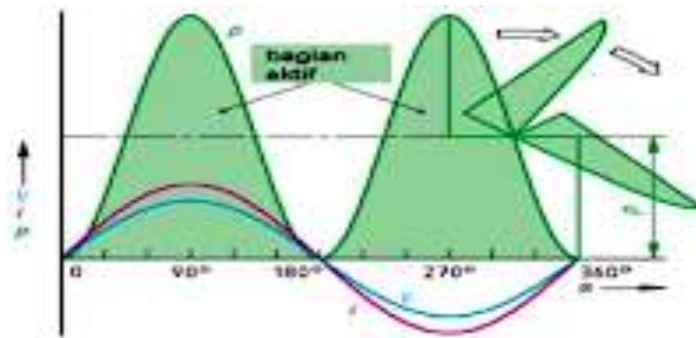
Trafo generator atau generator transformer berfungsi menaikkan tegangan pembangkitan 20 KV menjadi 150 KV yang berhubungan langsung dengan saluran transmisi, pada sistem interkoneksi se Jawa.

2.4 Macam – macam Daya Listrik

2.4.1 Daya Aktif

Daya aktif adalah daya yang sesungguhnya dibutuhkan oleh beban. Satuan daya aktif adalah **W** (*Watt*) dan dapat diukur dengan menggunakan alat ukur listrik *Wattmeter*.

Daya Aktif pada beban yang bersifat *resistansi* (**R**), dimana tidak mengandung induktor grafik gelombang *tegangan* (**V**) dan arus se fasa, sehingga besar daya sebagai perkalian tegangan dan arus menghasilkan dua gelombang yang keduanya bernilai positif. besarnya daya aktif adalah P. Sisa puncak dibagi menjadi dua untuk mengisi celah-celah kosong sehingga kedua rongga terisi oleh dua puncak yang mengisinya.



Gambar 2.5 Gelombang daya aktif pada beban yang bersifat resistansi.

Persamaan *Daya aktif* (**P**) pada beban yang bersifat *resistansi* :

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{2} \times P_m \\
 &= \frac{1}{2} \times V_m \times I_m \\
 &= \frac{1}{2} \sqrt{2} \times V \times \sqrt{2} \times I \\
 P &= V \times I \dots\dots\dots (3.1)
 \end{aligned}$$

Keterangan :

P= Daya Aktif (W)

P_m = Daya maksimum (W)

I_m = Arus listrik maksimum (A)

V_m = Tegangan maksimum (V)

V = Tegangan listrik (V)

I = Arus listrik (A)

Daya aktif pada beban *impedansi* (**Z**), beban *impedansi* pada suatu rangkaian disebabkan oleh beban yang bersifat *resistansi* (**R**) dan *induktansi* (**L**). Maka gelombang mendahului gelombang arus sebesar ϕ . Perkalian gelombang tegangan dan gelombang arus menghasilkan dua puncak positif yang besar dan dua puncak negatif yang kecil. Pergeseran sudut fasa bergantung seberapa besar nilai dari komponen induktor nya.



Gambar 2.6 Gelombang Daya Aktif dengan Beban Impedansi
(Gelombang tegangan mendahului arus sebesar $\phi = 60^\circ$).

Persamaan *daya aktif* (**P**) pada beban yang bersifat *impedansi* :

$$P = V \times I \times \cos \phi \dots\dots\dots (3.2)$$

Keterangan :

P = Daya aktif (W)

V = Tegangan (V)

I = Arus listrik (A)

$\cos \phi$ = Faktor daya

2.4.2 Daya Semu

Daya semu adalah daya yang dihasilkan dari perkalian tegangan dan arus listrik. Daya nyata merupakan daya yang diberikan oleh PLN kepada konsumen. Satuan daya nyata adalah **VA** (*Volt Ampere*).

Beban yang bersifat daya semu adalah beban yang bersifat resistansi (**R**), contoh : lampu pijar, setrika listrik, kompor listrik dan lain sebagainya. Peralatan listrik atau beban pada rangkaian listrik yang bersifat resistansi tidak dapat dihemat karena tegangan dan arus listrik se fasa perbedaan sudut fasa adalah **0°** dan memiliki nilai faktor daya adalah **1**.

Berikut ini persamaan daya semu :

$$S = V \times I \dots\dots\dots (3.3)$$

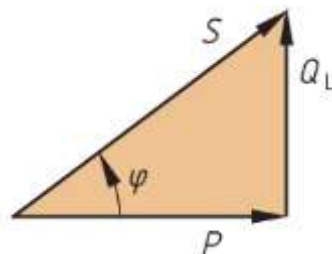
Keterangan :

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan (V)

I = Arus listrik (A)

- **Segitiga Daya**



Gambar 2.7 Segitiga Daya

(daya semu aktif, daya reaktif, dan daya semu)

Daya aktif (**P**) digambarkan dengan garis horizontal yang lurus. *Daya reaktif* (**Q**) berbeda sudut sebesar 90° dari daya aktif. Sedangkan *daya semu* (**S**) adalah hasil penjumlahan secara vektor antara *daya aktif* dengan *daya reaktif*. Jika mengetahui dua dari ketiga daya maka dapat menghitung salah satu daya yang belum diketahui dengan menggunakan persamaan berikut :

$P^2 = S^2 - Q^2$	$Q^2 = S^2 - P^2$	$S^2 = P^2 + Q^2$
$P = \sqrt{S^2 - Q^2}$	$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$
<small>1. Daya Aktif</small>	<small>2. Daya Reaktif</small>	<small>3. Daya Semu</small>

..... (3.4)

Keterangan :

P = Daya aktif

Q = Daya reaktif

S = Daya semu

2.4.3 Daya Reaktif

Daya reaktif adalah daya yang dibutuhkan untuk pembentukan medan magnet atau daya yang ditimbulkan oleh beban yang bersifat *induktif*. Satuan daya reaktif adalah **VAR** (*Volt.Amper Reaktif*).

Untuk menghemat daya reaktif dapat dilakukan dengan memasang kapasitor pada rangkaian yang memiliki beban bersifat *induktif*. Hal serupa sering dilakukan pada pabrik - pabrik yang menggunakan motor banyak menggunakan beban berupa motor - motor listrik.

Persamaan daya reaktif :

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \quad \text{..... (3.5)}$$

Keterangan :

Q = Daya Reaktif (VAR)

V = Tegangan (V)

I = Arus listrik (A)

$\sin \varphi$ = Faktor reaktif